COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES – IPEN
CENTRO DE ENGENHARIA NUCLEAR - CEN

PROJETO DE PESQUISA
EDITAL INTERNO – DPDE. Nº 4/2017

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR ESCOAMENTO EM ELEMENTOS COMBUSTÍVEIS TIPO PLACAS PARALELAS PARA REATORES NUCLEARES DE PESQUISA

Programa 4 – Atividade 450 – Reator Multipropósito Brasileiro

Coordenador: Alfredo José Alvim de Castro (Dr., IPEN/CNEN)
Equipe: Delvonei Alves de Andrade (Dr., IPEN/CNEN)
Marcelo da Silva Rocha (Dr., IPEN/CNEN)
Pedro Umbehaun (Dr., IPEN/CNEN)
Walmir Máximo Torres (Dr. IPEN/CNEN)
Miguel Mattar (Dr. IPEN/CNEN)
José Eduardo Rosa (Dr., IPEN/CNEN)
Luiz Antônio AlbiacTerremoto (Dr., IPEN/CNEN)
Michelangelo Durazzo (Dr., IPEN/CNEN)/*CCN
Roberto Navarro de Mesquita (Dr., IPEN/CNEN)
Antônio Belchior Júnior (MSc., IPEN/CNEN)
Adelk de Carvalho Prado (MSc., IPEN/CNEN)
Fernando de Castro Junqueira (MSc., IPEN/CNEN)
Nicolau Dyrjawoj (MSc. IPEN/CNEN)
José Antonio Batista de Souza (MSc. IPEN/CNEN)
Roberto Carlos dos Santos (Técnico Eletronico, IPEN/CNEN)
Renato Lima França (Técnico Mecânica/ IPEN/CNEN)
José Rodrigues Lima (Técnico projetista mecânico IPEN/CNEN)
Nikolas Scuro (Mestrando / IPEN/CNEN)
Pedro di Giovanni Santos (Mestrando IPEN/CNEN)
Javier di Giovanni Santos (Doutorando IPEN/CNEN)

São Paulo, Maio de 2017

RESUMO

Este projeto de pesquisa visa a construção de uma nova seção de testes, a modernização da bancada experimental e a continuação dos estudos de vibrações induzidas por escoamentos em elementos combustíveis de reatores nucleares de pesquisa tipo placas paralelas. O estudo do comportamento dinâmico das placas paralelas de elementos combustíveis é de grande importância para a segurança de reatores nucleares de pesquisa onde o alto fluxo de fluido de refrigeração pode atingir produzir condições operacionais críticas (velocidades críticas), provocando vibrações e podendo, em último caso, levar a placas de combustível ao colapso, o que pode implicar em acidente de graves proporções. O conhecimento dos limites operacionais dos elementos combustíveis projetados para serem utilizados no reator de pesquisa em desenvolvimento no Brasil requer a realização de testes que possam ser comparados com os critérios exigidos para o seu licenciamento de operação.

1. INTRODUÇÃO

1.1. O Problema

A otimização e o desenvolvimento de novos componentes de reatores de pesquisa, tais como trocadores de calor, geradores de vapor e elementos combustíveis que compõem os núcleos de reatores têm como objetivo comum o aumento da eficiência térmica, da densidade de potência e a minimização da ocorrência de falhas visando economizar capital e energia.

Através da evolução dos computadores e com base em técnicas mais sofisticadas de cálculo numérico aplicado aos fundamentos termodinâmicos e estruturais, consegue-se, atualmente, por um lado, projetar equipamentos de geração e transformação de energia que trabalhem em condições térmicas e fluidodinâmicas mais severas, alcançando maiores rendimentos. Por outro lado, as superfícies de troca de calor têm tido suas espessuras diminuídas para se reduzir a resistência à transmissão de calor, o que diminui a segurança destas superfícies contra cargas dinâmicas. Como resultado, estas superfícies ficam expostas a esforços mecânicos maiores e possibilidades de

falhas. Ao mesmo tempo é necessária, mesmo em condições operacionais desfavoráveis, uma alta disponibilidade dos componentes e também o aumento do intervalo de entre as manutenções preventivas dos equipamentos combinado com um sistema de monitoração e diagnose preditiva de falhas.

O exemplo de um componente crítico, de acordo com o problema exposto anteriormente, são os elementos combustíveis de um reator nuclear, seja um reator de potência ou de pesquisa.

Os elementos combustíveis de um reator nuclear de pesquisa são formados por placas de combustível metálicas à base de liga de Urânio (U_3Si_2) e Alumínio (Al). Essas placas possuem espessura da ordem de milímetros e comprimentos muito maiores em relação à sua espessura. Elas estão dispostas paralelamente no conjunto que forma o elemento combustível, de maneira a formar canais entre elas com poucos milímetros de espessura, por onde passa o escoamento do fluido de refrigeração (água leve ou água pesada), conforme pode ser observado no esquema de montagem na Fig. 1.

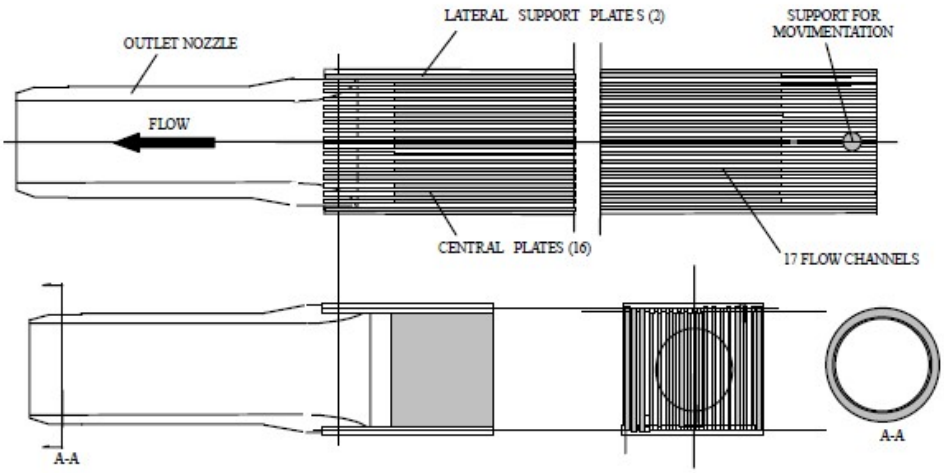

Figura 1 – Esquema de montagem de um elemento combustível de placas paralelas, [1]

Essa configuração, associada à necessidade de um escoamento com altas vazões para garantir o resfriamento das placas em operação pode gerar problemas de falhas mecânicas das placas de combustível devido às vibrações induzidas pelo escoamento nos canais e também pelo processo de ebulição convectiva (no caso crítico de operação) e, consequentemente a acidentes de proporções graves.

Esse fenômeno já tem sido bastante estudado e abordado por pesquisadores no intuito de se encontrar a condição de operação (velocidade do fluido, capacidade de

resfriamento das placas, integridade das placas, etc) que garanta a operação segura do núcleo do reator e uma grande disponibilidade de seus componentes.

Isto se torna um problema importante em usinas nucleares e reatores nucleares de pesquisa, nos quais as condições de trabalho podem variar muito e o sistema pode ficar exposto a um número maior de condições instáveis de equilíbrio com o aumento de esforços mecânicos gerados pelas vibrações.

Apesar das pesquisas existentes neste campo, a literatura especializada apresenta um grande número de problemas ocorridos em superfícies de troca de calor nos últimos 40 anos, principalmente em geradores de vapor de sistemas de alto rendimento térmico. Ao lado dos defeitos ocasionados por tensões térmicas ou influência química, aparecem em condição secundária aqueles ocasionados pelas vibrações induzidas em elementos combustíveis, [2,3,4].

Como mecanismos de excitação para as vibrações de elementos combustíveis podem ser vistos: o escoamento transversal do refrigerante, o escoamento axial do refrigerante, escoamento pulsante, o acoplamento fluidodinâmico com outros componentes em vibração, turbulências e ressonância acústica, além das vibrações induzidas pela ebulição convectiva nas placas em casos críticos de operação , [9-13].

Em componentes de troca de calor, todos esses mecanismos mencionados atuam conjuntamente e podem ser analisados individualmente em bancadas especificamente desenvolvidas nos laboratórios.

A velocidade crítica é a velocidade na qual as placas retangulares irão flambar e colapsar como resultado de vibrações induzidas por escoamento e da distribuição assimétrica de pressões no interior do elemento combustível. Embora não haja ruptura das placas combustíveis durante o colapso, as deflexões permanentes excessivas nas laterais das placas podem causar bloqueio ao escoamento no núcleo do reator e levar a superaquecimento nas placas. Este fenômeno representa uma importante consideração no projeto de reatores nucleares com elementos combustíveis do tipo placas paralelas.

O Reator Multipropósito Brasileiro (RMB), que está sendo concebido e projetado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), deverá utilizar um núcleo composto por elementos combustíveis formados por placas retangulares. O conhecimento da velocidade crítica de fluido refrigerante nas placas de combustível a serem utilizadas no RMB é de grande importância na fase de concepção dos elementos combustíveis, o que justifica a importância dos estudos propostos neste projeto de pesquisa.

1.2 Revisão da Literatura

O fenômeno de colapso em placas de combustíveis de reatores nucleares de pesquisa foi observado primeiramente no Reator de Testes de Engenharia (ETR-DOE/USA- Idaho-USA) nos anos 50. Foi observado que algumas placas apresentaram sinais de falha através da constatação por visualização de pequenas deformações de torção. Posteriormente, Miller, [2], usou a teoria de placas para equacionar a diferença de pressões entre os canais de resfriamento com a força de recuperação elástica da placa para estimar a velocidade crítica (U_d) na qual as placas colapsaram. O Colapso de placas é um tipo de falha de instabilidade estática que ocorre em velocidades moderadas, identificada por Kim e Davis, [3], como velocidade crítica estática divergente, U_d . Falhas do tipo instabilidade estática não devem ser confundidas com a instabilidade dinâmica de alta velocidade que ocorre com a velocidade crítica de ressonância U_R, quando a freqüência de excitação do escoamento coincide com a freqüência natural das placas de combustível.

Importantes investigações experimentais foram realizadas por Groninger e Kane , [4], Scavuzzu, [5], e Smissaert, [6], para verificação da velocidade crítica de Miller (velocidade crítica estática divergente). Nos experimentos realizados surgiram alguns resultados não coerentes como:

a) deflexão das placas em velocidades levemente inferiores a velocidade crítica de Miller e,
b) ausência do repentino colapso da placa previsto por Miller na velocidade crítica ou em sua proximidade.

Os resultados não coerentes foram justificados pelo movimento gradual das placas da sua posição central a cada incremento de velocidade durante o experimento.

Portanto, o colapso de placas ocorria no momento no qual as placas se tocavam após um gradual movimento das placas devido ao incremento de velocidade. Smissaert , [6], também apresentou resultados de colapso de placa apresentando alternadamente canais de refrigerante abertos e fechados, com placas colapsando em direções opostas.

A maioria dos núcleos de reatores nucleares não possuem as condições ideais de escoamento devido a turbulências, escoamentos axiais não uniformes, tolerâncias nas dimensões dos canais de resfriamento e flutuações de pressão produzidas pela bomba e outros equipamentos de processo. Assim, não se pode assumir uma distribuição

uniforme de velocidades nos canais de resfriamento. Miller descreveu o colapso do combustível como sendo devido à diferença de velocidades nos canais adjacentes. Esta diferença de velocidades produz a diferença de pressões nos dois lados da placa combustível. Quando a diferença de pressão entre os canais adjacentes é suficientemente grande para a placa resistir, a placa se deforma plasticamente.

O colapso da placa de combustível se origina das vibrações da placa. Quando o escoamento atravessa o canal estreito de resfriamento, a energia de pressão é convertida em energia cinética e cria uma força de sucção na parede. Esse resultado foi observado também por Ho et al., [7], e Castro ,[8] , em trabalhos mais recentes. Se as paredes se movem como no caso de placas de combustível paralelas, a seção transversal do canal de resfriamento pode diminuir obstruindo o escoamento. A obstrução do escoamento aumenta a pressão local para tentar vencer a resistência da restrição e o canal se abre. Este movimento de abertura e fechamento dos canais de resfriamento atua periodicamente, vibrando a estrutura podendo levar a grande deformação da placa combustível e superaquecimentos localizados. Castro, utilizou uma seção de testes composta por 3 canais de resfriamento com dimensões similares a geometria de concepção do elemento combustível do RMB. Neste trabalho, Castro desenvolveu uma técnica inédita para detecção da velocidade crítica utilizando extensômetros e sensores de pressão. A velocidade crítica obtida experimentalmente foi de 14,5 m/s, valor em torno de 90% do valor calculado com a Expressão desenvolvida pela Equação de Miller. Os valor experimental obtido por Ho et al, foi da ordem de 80% do valor calculado com a equação de Miller.

2 OBJETIVOS

Este projeto de pesquisa tem como objetivo a construção de uma nova seção de testes, a modernização da bancada experimental utilizada por Castro, [8], e a continuação dos estudos de vibrações induzidas por escoamentos em elementos combustíveis de reatores nucleares de pesquisa tipo placas paralelas.

Os testes propostos nessa fase serão realizados com água leve (água desmineralizada) e temperaturas compatíveis com as temperaturas de operação dos elementos combustíveis no reator. As placas não serão aquecidas, somente o fluido refrigerante (água leve).

Além disso, serão realizados estudos iniciais de modelagem de escoamento e de vibrações induzidas em escoamentos de refrigerante do tipo água leve em reatores com elementos combustíveis tipo placas paralelas. O presente projeto de pesquisa, poderá gerar dados reais e proporcionar o desenvolvimento de outro projeto a ser desenvolvido numa segunda etapa que consistirá do estudo de vibrações induzidas por ebulição convectiva nas placas de combustível numa suposta operação crítica do reator nuclear.

Este projeto servirá de base para desenvolvimento de novos projetos de iniciação científica, mestrado e doutoramento que envolverão a determinação de todos de vibrações induzidas em elementos combustíveis, tipo placa, e servirão de base para o projeto do elemento combustível de reatores de pesquisa.

Os dados experimentais gerados ao término desse projeto de pesquisa poderão auxiliar no projeto e desenvolvimento dos elementos combustíveis para o Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) que está em desenvolvimento. Além desse aspecto, há ainda o aspecto da capacitação e formação de novos pesquisadores na área nuclear , o que vem ao encontro dos objetivos propostos pelo Edital da DPD/IPEN.

3 METODOLOGIA

O projeto proposto constituirá na modernização da bancada de testes experimentais, realização de experimentos para levantamento de dados e simulações computacionais para análise do comportamento fluido estrutura.

O estudo será realizado utilizando a infraestrutura experimental da bancada de estudos de velocidade crítica do CEN, sendo que uma nova seção de testes será montada , parte da instrumentação , novos equipamentos para controle e sistema de aquisição de sinais serão adquiridos para que se possam atingir melhores condições de operação para os experimentos.A bancada experimental antiga foi desenvolvida e montada no Centro de Engenharia Nuclear (CEN), localizado no IPEN-CNEN/SP.

O diagrama esquemático da Bancada Experimental do CEN/IPEN/CNEN pode ser visualizada nas Figuras 2 e 3.

A Figura 4 apresenta a seção de testes utilizada para os experimentos de velocidade crítica por Castro [8].

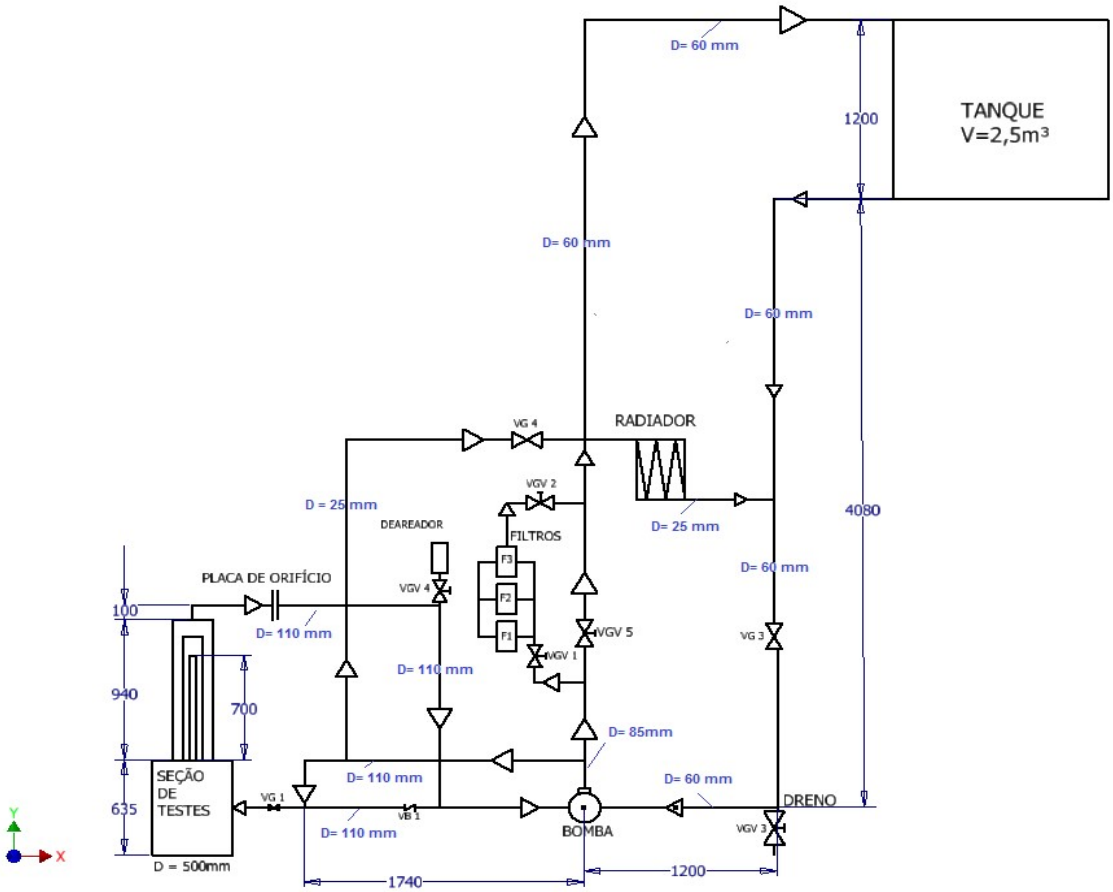

Figura 2 : Desenho esquemático da Bancada Experimental

Figura 3: Fotografia da Bancada Experimental

Figura 4: Seção de Testes utilizada nos experimentos de velocidade crítica

O recurso computacional disponível para execução do trabalho proposto já está disponível no CEN. Entretanto, caso haja demanda computacional adicional há disponibilidade no CEN de servidores com maior capacidade computacional para lidar com condições imprevistas.

O modelamento matemático será desenvolvido em volumes finitos através de programas de Dinâmica dos Fluídos Computacional (CFD) auxiliado pela ferramenta Ansys-CFX 16.0. Haverá exploração no desenvolvimento do modelo geométrico tridimensional, caracterização da malha disponível no módulo ICE, oriundo do mesmo pacote. As condições de contorno serão estabelecidas conforme interpretação física, correlacionando os resultados com o levantamento bibliográfico.

Visa-se reconhecer a vibração em elementos combustíveis, tipo placa, tanto no modo analítico e empírico. Deste modo a validação empírica será efetuada com os parâmetros de vibrações induzidas em escoamentos levantados experimentalmente.

4 MATERIAIS

Diversos equipamentos e sensores já existentes na seção de testes montada serão aproveitados nesse projeto, além de se contar com "softwares" e licenças de utilização para simulação numérica e de técnicos e outros profissionais que auxiliarão na montagem da seção de testes. Entretanto, há a necessidade de se substituir e modernizar alguns componentes da bancada de testes, fazendo-se novas aquisições e contratando-se serviços, como por exemplo o que segue abaixo:

a) Projeto e Fabricação de uma nova Câmara de Entrada para a Seção de Testes.
b) Projeto e Fabricação de uma nova Seção de Testes.
c) Aquisição de um novo sistema de aquisição de sinais
d) Aquisição de um Inversor de frequência para controle de vazão do sistema;
e) Montagem da nova Seção de Testes com a Câmara de Entrada na bancada experimental
f) Montagem do novo controle da Bomba com o Inversor de Frequência
g) Aquisição de novos Sensores de temperatura (termopares tipo K de diversos diâmetros); Transdutores de pressão tipo piezoelétrico para diversas faixas de pressão; Transdutores de pressão diferencial tipo piezoelétrico;Sensores tipo "strain gage" para medição da vibração e deformações das placas de combustíveis;
h) Computador para aquisição de dados tipo PC ou Notebook;

Dentre os materiais descritos acima, a maior parte será adquirida no mercado nacional e alguns componentes específicos poderão ser importados.

Item	Descrição	Custo Estimado
1-	Projeto e Fabricação de uma nova Câmara de Entrada para a Seção de Testes.	10.000,00 R$
2	Projeto e Fabricação de uma nova Seção de Testes.	15.000,00 R$
3	Serviço Montagem da nova Seção de Testes com a Câmara de Entrada na bancada experimental.	10.000,00 R$

4	Aquisição de um Inversor de frequência para controle de vazão do sistema;	40.000,00 R$
5	Montagem do novo controle da Bomba com o Inversor de Frequência	15.000,00 R$
6	Aquisição de um novo sistema de aquisição de sinais	69.100,00 R$
7	Aquisição de Instrumentação	20.000,00 R$

O orçamento previsto para que se possa realizar o projeto de pesquisa é de **R$ 179.100,00** (cento e setenta e nove mil e cem reais). EM Anexo seguem algumas especificações orçamentos.

Bolsas de pesquisa para alunos de iniciação científica, mestrado e doutorado serão solicitadas às agências de fomento nacionais, bem como à CNEN.

4 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

A Tabela a seguir apresenta um cronograma de atividades para a realização do trabalho proposto, em bimestres, por um período de dois anos:

Atividade	Bim 01	Bim 02	Bim 03	Bim 04	Bim 05	Bim 06	Bim 07	Bim 08	Bim 09	Bim 10	Bim 11	Bim 12
Projeto e Fabricação Camara	X	X										
Projeto e Fabricação Camara	X	X										
Montagem Câmara e Seção Testes			X									
Modelagem com CFD do Fenômeno	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		

Aquisição Inversor				X	X							
Montagem Controle Inversor						X						
Aquisição Aquisição Sinais				X	X							
Aquisição Instrumentação				X	X							
Realização Testes Experimentais				X	X	X	X	X	X	X		
Elaboração Relatórios Parciais			X			X			X			
Elaboração Relatório Final									X	X	X	X

5 REFERÊNCIAS

[1] Torres, W.M., Umbehaun, P.E., Andrade, D.A., and Souza, J.A.B., 2003, A MTR fuel element flow distribution measurement preliminary results, *Proceedings of 2003 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, Chicago, 6 p.

[2] Miller, D.R.,1958, Critical flow velocities for collapse of reactor parallel-plate fuel assemblies**,** *Knolls Atomic Power Laboratory Report, United States Atomic Energy Commission contract n° W-31-109 Eng-52*, New York.

[3] Kim, G., and Davis, D.C.,1995, Hydraulic instabilities in flat-plate type fuel assemblies, *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 158, pp. 1-17.

[4] Groninger, R.D., and Kane, J.J.,1963, Flow induced deflections of parallel flat plates, *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 16, pp. 218-226.

[5] Scavuzzo, R.J., 1965, Hydraulic instability of flat Parallel-plate assemblies, *Nuclear Science and Engineering*, Vol. 21, pp. 463-472.

[6] Smissaert, G.E., 1968, Static and dynamic hydro-elastic instabilities in MTR-type fuel elements Part I, introduction and experimental investigations, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 7, pp. 535-546.

[7] Ho, M., Hong, G., Mack, and A.N.F., 2004, Experimental investigation of flow-induced vibration in a parallel plate reactor fuel assembly, *15th Australian Fluid Mechanics Conference, The University of Sydney*, Sydney, 4 p.

[8] Castro, A.J.A., Andrade, D.A. , 2017, Análise experimental de velocidade crítica em elemento combustível tipo placa plana para reatores nucleares de pesquisa, Tese de Doutorado IPEN/CNEN, 02/2017, São Paulo -Brasil.

[9] Martens, V., Sergemann D., 1990, Schwingungsanregung von Wärmetauscherrohren Durch Mantelseitiges Unterkühltes Sieden, *Kerntechnick*, Vol. 55.

[10] MARTENS, V., 1989, Untesuchung der Schwingungsanregung von Wärmetauscherrohren Durch Mantelseitiges Untekühles Sieden, *Dissertation University von Hannover*, German.

[11] Castro, A.J.A. Maprelian, E., and Ting, D.K.S.,1999, Onset of nucleate boiling and onset of fully developed subcooled boiling detection using pressure transducers signals spectral analysis, *15°COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica 1999*, Águas de São Pedro, São Paulo.

[12] Castro, A.J.A., and Ting, D.K.S., 1998, Subcooled boiling detection using pressure transducers signals spectral analysis, *Maintenance and Reliability Conference - MARCON98*, Tennessee University, EUA.

[13] Castro, A.J.A., Martens, V., and Stegemann, D.,1991, Análise de vibrações em barras excitadas por ebulição subresfriada, *ENFIR – 1991 Encontro Nacional de Física de Reatores*, Atibaia, Brasil.